

재밍 환경에서 잡음 부공간을 이용한 고속 모노펄스 방법

Fast Monopulse Method Using Noise-Jamming Subspace

임 종 환 · 김 재 학* · 양 훈 기**

Jong-Hwan Lim · Jae-Hak Kim* · Hoon-Gee Yang**

요 약

재밍 환경에서의 maximum likelihood(ML) 기반의 모노펄스 기법은 공분산 행렬의 역행렬을 이용하여 재머 신호를 억제시킨다. 재머 억제를 위해서는 재머 성분에 대한 충분한 횟수의 스냅샷(snapshot)이 필요하며, 높은 PRF 환경에서는 이것이 가능하지 않아 실시간 추적에 한계가 있다. 또한, JNR(Jammer to Noise Ratio)이 낮은 경우에는 재머의 스냅샷 수가 충분하더라도 정확한 재머 억제가 이루어지지 않아, 표적 방향 추정의 정확도가 감소한다. 본 논문에서는 재밍 환경에서 스냅샷이 적은 경우에도 ML 기반의 모노펄스 성능이 우수한 방법을 제안한다. 제안된 방법은 공분산 행렬의 잡음 부공간을 이용하는 모노펄스 방법으로, 이의 유도 과정을 보이고, 모의실험을 통해 기존의 방법에 비해 성능이 개선된 것을 보인다.

Abstract

A monopulse based on maximum likelihood(ML) in jamming scenario can suppress jamming signal using an inverse matrix of a covariance matrix. In order to achieve adequate suppression of jamming signal, the sufficient number of snapshots is required. However, this is not possible in high PRF scenario, which hinders a real-time tracking. Moreover, even with the large number of snapshots, the estimation accuracy of the target direction is decreased in low JNR(Jammer to Noise Ratio) due to insufficient jammer suppression. In this paper, we propose a monopulse algorithm that doesn't degrade performance significantly with a small number of snapshots and in low JNR. We show its derivation that exploits noise-jammer subspace of a covariance matrix, along with its performance through simulation.

Key words: Monopulse, Maximum Likelihood, Covariance Matrix, Jammer, Noise Subspace

I. 서 론

재밍 환경에서 표적의 방향을 추정하기 위해서는 수신 신호로부터 재머 신호를 제거하는 과정이 필요하다. Nickel이 제안한 ML(Maximum Likelihood) 기반의 모노펄스

방식의 경우, 재머 신호의 데이터 스냅샷으로 계산되는 공분산 행렬(covariance matrix)의 역행렬을 이용한 가중치 벡터를 이용하여 재머 신호를 억제시키고, 표적의 방향을 추정한다^{[1],[2]}. 이때 역행렬을 이용하여 재머 성분을 효과적으로 억제하기 위해서는 많은 수의 재머 스냅샷을 이

「이 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 국방 피탐지 감소 기술 특화 연구센터 사업의 일환으로 수행되었음.」

(주)한화 종합연구소(Hanwha Corporation Defence R&D Center)

*광운대학교 방위사업학과(Department of Defense Acquisition Program, Kwangwoon University)

**광운대학교 전자공학과(Department of Electronics Convergence Engineering, Kwangwoon University)

· Manuscript received August 26, 2013 ; Revised September 24, 2013 ; Accepted January 28, 2014. (ID No. 20130826-077)

· Corresponding Author: Hoon-Gee Yang (e-mail: hgyang@kw.ac.kr)

용하여 공분산 행렬을 계산해야 하며, 이는 모노펄스 기술의 중요한 성능 평가 항목인 실시간성을 저해한다. 또한, 이 방식은 JNR(Jammer-to-Noise Ratio)이 낮은 경우에는 수신 신호로부터 재머를 억제하더라도 재머 성분이 남아있어 모노펄스 성능이 저하된다.

본 논문에서는 스냅샷 개수가 충분히 많지 않고, 또한 JNR이 크지 않은 상황에서도 성능 열화가 크지 않은 잡음 부공간을 이용한 모노펄스 방법을 제안한다. II장에서는 Nickel이 제시한 재밍 환경에서의 ML 기반 모노펄스 알고리즘에 대해 살펴보고, III장에서는 잡음 부공간을 이용한 재머 억제 방법과 이를 이용한 모노펄스 알고리즘을 제시하고, IV장에서는 모의 실험을 통하여 제안한 모노펄스 방법의 성능을 검증하고, V장에서는 결론을 맺는다.

II. 재밍 환경에서의 ML 기반 모노펄스

표적에 반사된 레이더 펄스와 재머 신호가 선형 배열 안테나에 수신될 때 수신 신호 벡터 \mathbf{z} 는 다음과 같다.

$$\mathbf{z} = \mathbf{a}b + \mathbf{n} \quad (1)$$

식 (1)에서 b 는 표적 신호의 진폭을 나타내고, \mathbf{n} 은 백색 잡음과 재머 신호로 이루어진 간섭 신호 벡터를 나타낸다. \mathbf{a} 는 표적 신호의 방향 벡터로 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a} = \begin{pmatrix} \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}x_1u_1\right] \\ \vdots \\ \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}x_Nu_1\right] \end{pmatrix} \quad (2)$$

$x_i (i = 1, \dots, N)$ 는 배열 소자들의 위치이고, N 은 배열 소자들의 수, u 는 방위각 θ 와 $u \equiv \sin\theta$ 관계가 있는 방향 변수로서 θ_1 에서 입사하는 경우 $u_1 = \sin\theta_1$ 의 관계가 있다. 이 때 수신 신호 \mathbf{z} 의 확률밀도 함수는 다음과 같다.

$$p(\mathbf{z}/u_1, b) = \frac{1}{\pi^N |\mathbf{Q}|^{-1}} \exp(-(\mathbf{z} - \mathbf{a}b)^H \mathbf{Q}^{-1} (\mathbf{z} - \mathbf{a}b)) \quad (3)$$

식 (3)에서 \mathbf{Q} 는 재머 신호에 대한 공분산 행렬을 나타

내며, \mathbf{Q}^{-1} 는 \mathbf{Q} 의 역행렬이며, 첨자 H 는 conjugate transpose를 나타낸다. 확률밀도 함수 $p(\mathbf{z}/u_1, b)$ 를 최대로 만드는 u 를 찾는 ML 기반 모노펄스 방식은 참고문헌 [3]에서 제시한 과정을 통해서 다음과 같이 모노펄스 방정식을 유도할 수 있다.

$$\hat{u}_1 = u_0 - \left(\mu_x^2 - \frac{\hat{\mathbf{d}}_x^H \mathbf{d}_x}{\mathbf{w}^H \mathbf{a}} \right)^{-1} \left(\text{Re} \left\{ \frac{\hat{\mathbf{d}}_x^H \mathbf{z}}{\mathbf{w}^H \mathbf{z}} \right\} - \mu_x \right) \quad (4)$$

식 (4)에서 \hat{u}_1 은 u_1 에 대한 모노펄스 알고리즘의 추정값이며, u_0 는 레이더의 조향 방향을 나타낸다. 또한, \mathbf{w} 는 수신 신호에 곱해지는 가중치 벡터이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{w} = \left(\mathbf{a}^H(u_0) \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a}(u_0) \right)^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a}(u_0) \quad (5)$$

재밍 환경에서 수신 신호에 포함된 재머 신호는 가중치 벡터에 포함된 \mathbf{Q}^{-1} 에 의해 억제된다. 또한, 식 (4)에서 $\hat{\mathbf{d}}_x$, \mathbf{d}_x , μ_x 는 \mathbf{w} 의 u 에 대한 편미분을 계산하는 과정에서 파생된 인수로 다음과 같다.

$$\hat{\mathbf{d}}_x = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{a}(u_0)^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a}(u_0) \right)^{-\frac{1}{2}} \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{D}_x \mathbf{a}(u_0) \quad (6)$$

$$\mathbf{d}_x = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{D}_x \mathbf{a}(u_0) \quad (7)$$

$$\mu_x = \frac{\text{Re} \{ \mathbf{d}_x^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a}(u_0) \}}{\mathbf{a}(u_0)^H \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{a}(u_0)} \quad (8)$$

여기서 \mathbf{D}_x 는 $\text{diag}(-jx_i)$ 를 나타낸다.

III. 잡음 부공간을 이용한 ML 기반 모노펄스

재밍 환경에서 표적 신호 성분이 차지하는 영역은 시간 도메인에서 유한한 구간에 존재한다. 그러므로 시간 도메인에서 신호 성분과 재머 성분은 분리된다고 가정할 수 있다. 또한, 재머 성분과 표적 신호 성분은 uncorrelated하다고 가정할 수 있다. N 개의 배열 소자를 갖는 선형 배열 안테나에서 재머 신호와 잡음의 데이터 스냅샷으로 계산된 공분산행렬 \mathbf{Q} 는 다음과 같이 고유치 분해(eigen

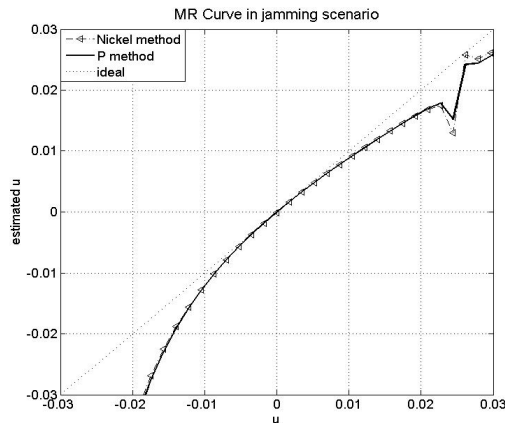


그림 1. 재밍 환경에서의 MR curve
Fig. 1. MR curve in jamming scenario.

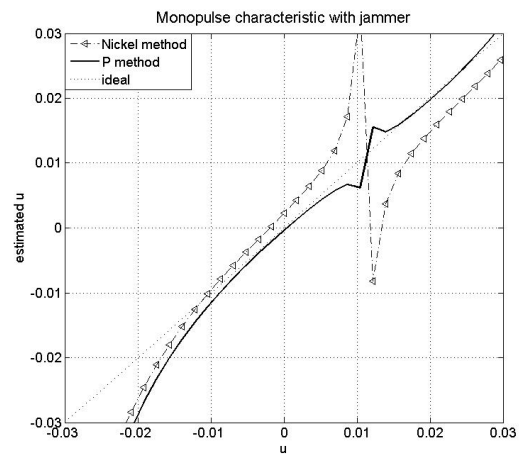


그림 3. 낮은 JNR 환경에서의 MR curve
Fig. 3. MR curve in low JNR environment.

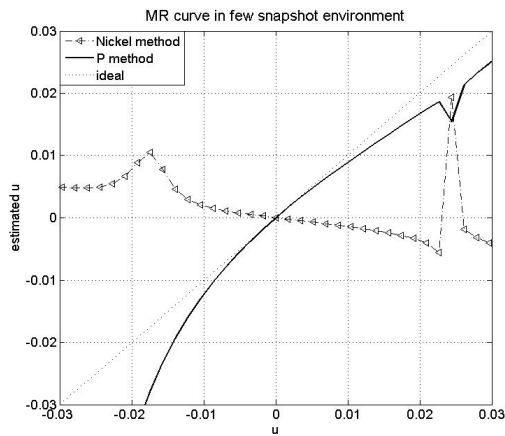


그림 2. 적은 스냅샷 개수에서의 MR curve
Fig. 2. MR curves in few snapshot environment.

Q^{-1} 가 이론상으로 존재하지 못하며 시뮬레이션에 더해지는 잡음에 따라 Q^{-1} 가 얻어지는 경우라도 방향 추정의 정확도가 매우 낮았다. 반면, 제시된 방법은 스냅샷이 300개일 때의 MR curve와 성능이 거의 유사하였다. 그림 3은 재머 입사방향이 0.63° , JNR이 10 dB일 때, 300개의 재머 스냅샷을 이용한 결과이다. Nickel 방식의 MR curve는 표적 방향에 상관없이 오차가 발생함을 확인할 수 있다. 제시된 방식의 MR curve는 JNR이 27 dB인 환경에서의 실험 결과와 성능이 거의 유사하였다.

V. 결 론

Nickel이 제안한 ML 기반 모노펄스 알고리즘은 Q 가 full rank가 되도록 하기 위해 충분한 횟수의 스냅샷이 필요하며, 또한 역행렬 연산을 부가적으로 수행해야 한다. 특히 JNR이 낮은 경우에는 재머 역제가 충분하지 못하여 알고리즘의 성능이 저하되었다. 본 논문에서 제시한 방법은 공분산 행렬의 잡음 부공간을 이용한 모노펄스 방식으로 적은 스냅샷 및 Q 의 역행렬 연산 과정이 없어서 연산 측면에서 우수하며, 모의실험 결과 JNR이 낮은 환경에서도 알고리즘의 성능이 우수함을 보였다. JNR이 주어져 있을 때 제시한 방식이 우수한 성능을 보이기 위한 스냅샷 회수에 대한 전략적 분석 연구를 추후 진행하고자 한다.

References

- [1] Samuel M. Sherman, *Monopulse Principle and Techniques*, Artech House Edition, 1984.
- [2] K. B. Yu, D. J. Murrow, "Adaptive digital beamforming for angle estimation in jamming", *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 2, pp. 508-523, Apr. 2001.
- [3] U. Nickel, "Monopulse estimation with adaptive arrays", *Radar and Signal Processing, IEE Proceedings F*, vol. 140, no. 5, pp. 303-308, Oct. 1993.